

14. Ferrari, B. Optimization of air classification for the production of β -glucan-enriched barley flours / B. Ferrari, F. Finocchiaro, et al. // Journal of cereal science. – 2009. – vol. 50 (2). – P. 152-158.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВ СИЛАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Лавинский Д.В.

*к.т.н., доцент кафедры теоретической механики
Национального технического университета «ХПИ»*

THE DEFORMATION OF THE COMPOUND STRUCTURES FOR POWDER COMPACTION BY ELECTROMAGNETIC FIELD FORCES

Lavinsky D.V.

*Ph. Dr., associate professor of the Department of theoretical mechanics
National Technical University "KhPI"*

Аннотация

В работе приведена постановка задачи анализа деформирования составных конструкций, использующихся для прессования порошковых материалов. Рассмотрена возможность совместного использования традиционного псевдоизостатического прессования и электромагнитного прессования. В качестве численного метода решения используется метод конечных элементов. Приведены результаты расчетов, иллюстрирующие распределение напряженности магнитного поля и интенсивности напряжений.

Abstract

The problem statement of the compound structures deformation for powder compaction is given in this article. The capability of the joint use of traditional pseudoisostatic compaction and electromagnetic compaction is considered. The finite element method is used as numerical method of solution. It is given the numerical results, which show the magnetic field intensity and von Mises equivalent stress distribution.

Ключевые слова: составные конструкции, прессование порошковых материалов, электромагнитное поле, напряженно-деформированное состояние.

Keywords: compound structures, powder compaction, electromagnetic field, stress-strain state.

Большое количество технологических операций связано с прессованием порошковых материалов. Прессование изделий с помощью порошков тугоплавких соединений типа карбид вольфрама, кобальта, никеля при температуре до 1800°C и давлениях прессования 30 – 40 МПа в пресс-формах проводится в матрицах из тугоплавких материалов. При давлениях больше 40 МПа матрицы в пресс-формах разрушаются. Поэтому создание расчетных методов оценки прочности на базе анализа напряженно-деформированного состояния является актуальной научной задачей.

Для прессования изделий с помощью порошка при давлениях до 100 МПа и температуре до 1800°C для матрицы можно использовать углерод-углеродный материал (УУКМ) [2], который может работать в таких условиях. В работах [3,4] представлена расчетная схема пресс-формы, приведена постановка задачи анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) составной пресс-формы из УУКМ и приведены результаты расчетов. На основе, приведенных расчетных данных сделаны рекоменда-

ции о конструктивном исполнении основных элементов пресс-формы: матрицы и бандажа.

Также существует большое количество технологических операций, в которых используется электромагнитное поле (ЭМП) для создания силового воздействия на обрабатываемый объект. Одним из приложений использования импульсных ЭМП (ИЭМП) является прессование изделий из порошковых материалов [1]. При этом элементы технологической системы: индуктор и пресс-форма, также как и обрабатываемый порошковый материал, испытывают силовое воздействие за счет возникновения электромагнитных сил. Энергия, развиваемая ИЭМП может достигать уровней, при которых электромагнитные силы вызывают разрушение элементов конструкций пресс-форм. Таким образом, и в данном случае анализ НДС элементов технологической схемы является неотъемлемым этапом процесса проектирования.

На рис.1 представлена расчетная схема составной матрицы пресс-формы из УУКМ [3,4]. Здесь 1 – внутренний цилиндром-вкладыш, выполненный из графита, 2 – наружный несущий цилиндр, изготовленный из УУКМ (наружный цилиндр одет на внутренний без зазора), 3,5 – верхний и нижний пуансоны из УУКМ, 4 – порошок, с помощью которого прессуют изделия. Показаны схемы приложения сил к матрице и бандажу в процессе прессования.

Для повышения эффективности технологической операции предполагается совместное использование псевдоизостатического и электромагнитного прессования. Для этого предполагается дополнительно использовать многовитковый индуктор, который устанавливается снаружи поддерживающего цилиндра из УУКМ. Если добавить внешний многовитковый индуктор – позиция 6 (рис.2), то возникнут электромагнитные силы, действующие на обрабатываемый порошок и направленные в диаметрально противоположную сторону, что приведет к снижению уровня напряжений в матрице и бандаже.

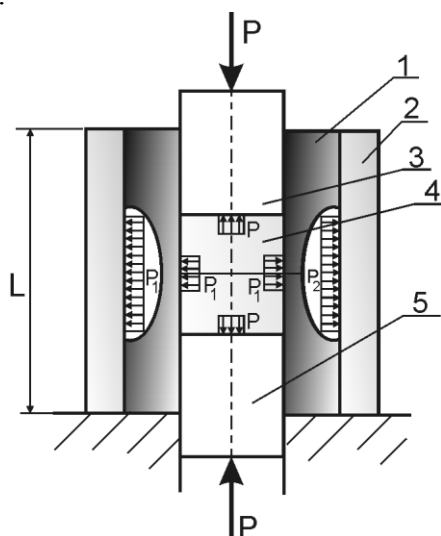


Рис. 1. Расчетная схема пресс-формы традиционного псевдоизостатического прессования

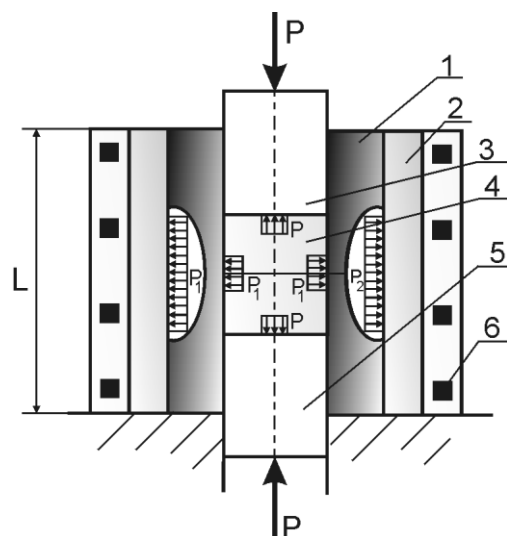


Рис. 2. Расчетная схема пресс-формы совместного псевдоизостатического и электромагнитного прессования

Анализ прочности полученной составной конструкции предполагает последовательное решение задач о распределении векторных характеристик ЭМП и тензорных характеристик процесса деформирования с учетом физически нелинейного поведения материала и контактного взаимодействия элементов конструкции пресс-формы и индуктора. Подробная математическая постановка задачи приведена в работах [5,6]. В качестве численного метода анализа использован метод конечных элементов, который в данном случае базируется на принципе минимума полной энергии системы.

Далее рассмотрим распределение векторных компонент ЭМП и тензорных компонент процесса деформирования для расчетной схемы, представленной на рис.2. Геометрические размеры элементов конструкции составной матрицы такие же, как и в работе [4], толщина внешнего индуктора принималась такой же, как и у наружного несущего цилиндра.

Механические свойства материала приняты следующими: цилиндр-вкладыш – графит: предел прочности на растяжение – 15 МПа, предел прочности на сжатие – 51,5 МПа, модуль упругости – $1,05 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона – 0,2; наружный несущий цилиндр – УУКМ: предел прочности на растяжение – 110 МПа, предел прочности на сжатие – 100 МПа, модуль упругости – $1,8 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона – 0,19; изоляция токопровода индуктора – материал капролон: модуль упругости – $2,5 \cdot 10^3$ МПа, коэффициент Пуассона – 0,3, предел прочности при растяжении – 70 МПа, предел прочности при сжатии – 90 МПа; токопровод индуктора – медь: модуль упругости – $18 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона – 0,33, предел текучести – 180 МПа.

Давление прессования принималось 100 МПа, амплитуда силы тока в импульсе – 30 кА. Задача решена для осесимметричной модели. В качестве базового выбирался четырехузловой осесимметричный конечный элемент с билинейной аппроксимацией перемещений и окружной компоненты векторного магнитного потенциала. Особенности использования элементов подобного типа подробно рассмотрены в работах [8,9]. На границах раздела между составными частями конструкции вводились слои контактных конечных элементов. Вопросы, связанные с выбором характеристик «контактных» конечных элементов для осесимметричных конструкций рассматривались в работе [7].

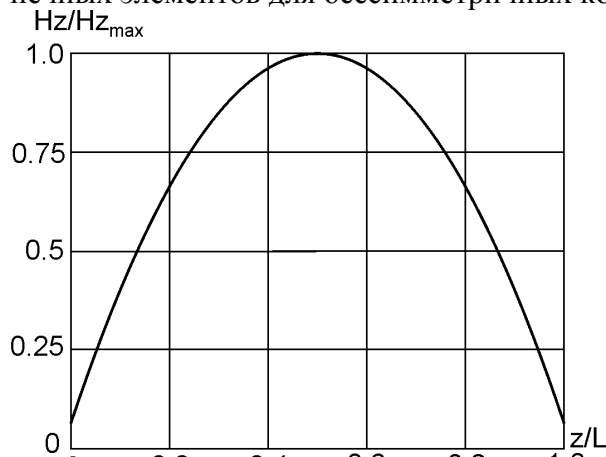


Рис. 3. Распределение касательной компоненты напряженности магнитного поля вдоль границы раздела «вкладыш – заготовка»

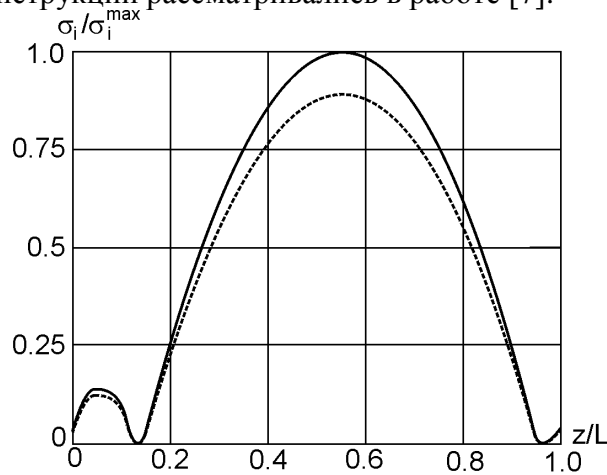


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений в точках внутренней поверхности вкладыша

На первом этапе решения получены распределения векторных компонент ЭМП. На рис.3 приведено качественное распределение касательной компоненты напряженности магнитного поля вдоль границы раздела «вкладыш – заготовка». Распределение дано для момента времени, соответствующего временному максимуму. Как видно, максимальные значения напряженности наблюдаются на середине длины вкладыша, следовательно, именно здесь следует ожидать снижение силового воздействия при совместном использовании псевдоизостатического и электромагнитного прессования.

Далее проанализируем НДС системы «индуктор – составная матрица – заготовка» при использовании псевдоизостатического и электромагнитного прессования. На рис. 4 приведено качественное распределение интенсивности напряжений в точках внутренней поверхности вкладыша. Сплошная линия – для случая псевдоизостатического

прессования, штриховая линия – для случая совместного использования псевдоизостатического и электромагнитного прессования. Как и в случае псевдоизостатического прессования максимальные значения наблюдаются на середине длины вкладыша, но наличие электромагнитных сил здесь, действительно, приводит к значительному (порядка 15%) уменьшению максимальной интенсивности напряжений.

В заключение отметим, что в работе рассматривается один из подходов к прессованию порошковых материалов, в котором используется традиционное псевдоизостатическое и электромагнитное прессование. Приведена обобщенная расчетная модель составной пресс-формы из углерод-углеродного композитного материала и внешнего многовиткового индуктора.

Проведен анализ распределения ЭМП и НДС в элементах системы «индуктор – составная пресс-форма», который показал, что использование ЭМП снижает уровни интенсивности напряжений в пресс-форме.

Литература

1. Mamalis A. G., Manolakos D. E., Kladas A. G., & Koumoutsos A. K. (2004, March). Electro-magnetic tooling for metal forming and powder compaction: numerical simulation. In *Proceedings of the 1 st International Conference on High Speed Forming* (pp. 143-154).

2. Бушуев Ю.Г., Персин М.И., Соколов В.А. Углерод-углеродные композиционные материалы. Справочник. М. «Металлургия», 1994, 128 с.

3. Бирюков О.В. Статический анализ прочности конструктивных элементов пресс-форм для прессования изделий из порошков / О. В. Бирюков, С. Ю. Саенко, В.В. Колосенко, Лавинский Д.В., Соболев В.Н., Морачковский О.К. // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Динамика и прочность машин. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2006. – № 32. – С. 28-32.

4. Ашихмин В.П. Анализ прочности элементов пресс-форм из углерод-углеродных материалов для псевдоизостатического прессования / В.П. Ашихмин, О.В. Бирюков, В.А. Гурин, Б.Б. Затолока, В.В. Колосенко, С.Ю. Саенко, Д.В. Лавинский, О.К. Морачковский // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (91). – 2007. – № 6. – С.120-123.

5. Лавінський Д. В. Пружно-пластичне деформування систем тіл при дії електромагнітних полів / Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Вісник Запорізького національного університету : зб. навч. ст. Фізико-математичні науки. – Запоріжжя: ЗНУ, 2015. – № 2. – С. 125-135.

6. Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K. and Lavinsky D. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields // DOI: 10.1007/s00161-015-0484-8 *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. – volume 27. – issue 12. – 2015. – pp1-13.

7. Bondar' S.V. Study of thermoelastoplastic contact deformation of production tooling mixed structures / S. V. Bondar', D. V. Lavinskii // *Strength of Materials*. – 2011. – Vol. 43, № 4. – p. 447-454.

8. Cazzani, A., Atluri, S.N.: Four-noded mixed finite elements, using unsymmetric stresses, for linear analysis of membranes. *Comput. Mech.* 11 (4), 229–251 (1993).

9. Cazzani, A., Garusi, E., Tralli, A., Atluri, S.N.: A four-node hybrid assumed-strain finite element for laminated composite plates. *CMC Comput. Mater. Contin.* 2 (1), 23–38 (2005).